Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
UFGD Editora

# EFEITO DE UM EVENTO DE FRIAGEM NO CENÁRIO DE MUDANÇA NO USO E COBERTURA DA TERRA NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

## *Effect of a cold surge event on the scenario of change in land use and cover in the Southwest Amazon*

## *Efecto de un evento de fríagem en el contexto de cambio en el uso y cobertura de la tierra en el Suroeste de la Amazonía*

**Bárbara Antonucci**
Doutorado em Clima e Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
antonucci.engenharia@gmail.com

**Gutieres Camatta Barbino**
Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos/ Polo UNIR, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Rondônia (UNIR)
gutieres.barbino@gmail.com

**Nara Luísa Reis de Andrade**
Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos/ Polo UNIR, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Rondônia (UNIR)
naraluisar@gmail.com

**Alberto Dresch Webler**
Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Rondônia (UNIR)
alberto.webler@unir.br

**Resumo:** A conversão de florestas altera o microclima. A entrada de massas polares ocorre na América do Sul, no entanto, na Amazônia o efeito é diferente, com quedas da temperatura no inverno e chuvas de convecção no verão. Diante disso, caracterizou a friagem em áreas com coberturas de floresta, pastagem e cidade na região central do estado de Rondônia, bem como, entender a atuação dos fenômenos em cada cobertura. Foram utilizados dados das torres micrometeorológicas do Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia na cidade acima de um prédio, e os dados da floresta e pastagem foram coletados em torre com alturas de 62m e 08m, respectivamente. No ano de 2017 foi identificado a entrada de um evento de friagem nos quais a redução média de 31% na temperatura mínima ocorreu para as 03 coberturas. Como característica da massa polar, a umidade especifica nas localidades reduziu na passagem dos eventos, no entanto, somente na floresta ocorreu chuva com características frontais. Notou-se uma duplicação no valor da velocidade do vento e predominância do vento Sul. Após a passagem da friagem, o

reestabelecimento da temperatura média ocorreu em 03 dias. De maneira geral, as condições micrometeorológicas locais são alteradas pela entrada da massa de ar fria e seca, sendo que os impactos são mais intensos nas áreas antropizadas. No entanto, são necessários mais estudos para avaliar a influência da cobertura do solo nessa resposta e possíveis impactos na vida da população.
**Palavras-chave:** Conversão de Florestas na Amazônia. Efeito de Massa Polar. Microclima.

**Abstract:** The conversion of forests alters the microclimate. The entry of polar air masses occurs in South America, but in the Amazon, the effect is different, with temperature drops in winter and convective rains in summer. In this context, the cold surge was characterized in areas with forest, pasture, and urban land cover in the central region of Rondônia state, aiming to understand the phenomena's behavior in each type of cover. Data from micrometeorological towers of the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA) were used, with the urban tower located above a building, and the forest and pasture towers at heights of 62m and 8m, respectively. In 2017, a cold surge event was identified, leading to an average reduction of 31% in minimum temperatures across the three cover types. As a characteristic of polar air masses, specific humidity decreased in the affected areas, and frontal rainfall was observed only in the forest. Wind speed doubled, with a predominance of southerly winds. After the passage of the cold surge, the average temperature was restored within three days. Overall, local micrometeorological conditions are altered by the influx of cold and dry air masses, with more significant impacts observed in anthropized areas. However, further studies are needed to assess the influence of land cover on these responses and potential impacts on the population's livelihood.
**Keywords:** Conversion of Forests in the Amazon. Polar Mass Effect. Microclimate.

**Resumen:** La conversión de los bosques altera el microclima. La entrada de masas de aire polar ocurre en América del Sur, pero en la Amazonía, el efecto es diferente, con descensos de temperatura en invierno y lluvias convectivas en verano. En este contexto, se caracterizó el fenómeno conocido como "friagem" en áreas con cobertura forestal, pastizales y áreas urbanas en la región central del estado de Rondônia, con el objetivo de comprender el impacto de estos fenómenos en cada tipo de cobertura. Se utilizaron datos de torres micrometeorológicas del Programa de Gran Escala de la Biosfera-Atmósfera en la Amazonía (LBA), siendo la torre urbana instalada sobre un edificio, y las torres de bosque y pastizales con alturas de 62m y 8m, respectivamente. En el año 2017, se identificó un evento de friagem, con una reducción promedio del 31% en las temperaturas mínimas en las tres coberturas. Como característica de las masas de aire polar, la humedad específica disminuyó en las localidades afectadas por el evento, y solo se observaron lluvias frontales en el bosque. La velocidad del viento se duplicó, con predominio de vientos del sur. Después de la friagem, la temperatura media se restableció en tres días. En general, las condiciones micrometeorológicas locales se ven alteradas por la entrada de masas de aire frío y seco, con impactos más significativos en áreas antropizadas. Sin embargo, se requieren más estudios para evaluar la influencia de la cobertura del suelo en estas respuestas y los posibles impactos en la vida de la población.
**Palabras clave:** Conversión de Bosques en la Amazonía. Efecto de masa polar. Microclima.

Submetido em: 10/01/2023
Aceito para publicação em: 30/06/2023
Publicado em: 15/07/2023

# 1. INTRODUÇÃO

A Amazônia Legal é um sistema complexo que integra ambientes, incluindo a Floresta Amazônica, centros urbanos, áreas agrícolas e pastagens (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Além disso, essa região contribui com aproximadamente 20% do fluxo de água doce do planeta e desempenha um papel crucial na regulação do clima em níveis regional e global, por meio da evapotranspiração (PACA *et al.*, 2019). No entanto, devido à conversão de florestas em pastagens decorrente da expansão da fronteira agrícola, a Amazônia Legal se tornou uma das maiores fontes de emissão de dióxido de carbono (AMARAL *et al.*, 2019).

Nesse contexto, os modelos climáticos para região preveem um aumento de aproximadamente 4°C na temperatura e um aumento na aridez e nos incêndios até o final do século XXI, o que representa um cenário alarmante (IPCC, 2021). Caso as taxas atuais de desmatamento, que são uma das principais fontes de emissão de carbono para atmosfera (METCALFE *et al.*, 2018), sejam mantidas, espera-se uma redução na quantidade de chuvas (SAMPAIO *et al.*, 2021).

A sazonalidade climática da região amazônica depende da interação fenômenos de macroescala, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), com fenômenos em escalas menores, e o mosaico da cobertura da terra desempenha um papel determinante nessa interação (SÁTYRO *et al.*, 2021). A cobertura da terra está associada ao aumento do albedo e da temperatura da superfície (PAVÃO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2021). Em termos de mesoescala na Amazônia, os autores Fisch, Marengo e Nobre (1998) explicam o papel das massas polares ao longo do ano, enquanto Silva Dias *et al.* (2004) destacam a importância das friagens para as chuvas convectivas.

As massas polares vêm do Atlântico Sul durante todo o ano na América do Sul (AMORIM-NETO; SATYAMURTI; CORREIA, 2015; LONGO *et al.*, 2004) e têm como principal característica a rápida elevação da pressão e diminuição da temperatura do ar no inverno (GARREAUD, 1999), resultando em chuvas convectivas no verão (GARREUD; WALLACE, 1998).

Na Amazônia, a entrada dessas massas polares é comumente chamada de friagem, termo que será usada neste estudo. Um dos primeiros estudos sobre a caracterização da friagem em relação ao tempo de resposta, frequência de ocorrência e duração do evento foi realizado por Marengo *et al.* (1997), abrangendo os Estados de Rondônia, Amazonas e Pará. Posteriormente, Silva Dias *et al.* (2004) identificaram que esse evento de macroescala tem a

capacidade de afetar a brisa do rio Tapajós e, consequentemente, influenciar os ciclos biogeoquímicos na floresta, conforme demonstrado por Tóta *et al.* (2004). Recentemente, Camarinha-Neto *et al.* (2021) avaliaram a influência de uma friagem na Torre Alta de Observação da Amazônia e descobriram que o evento resultou em um aumento na taxa de mistura de dióxido de carbono e uma queda na taxa mistura do ozônio acima do dossel da floresta.

No Sul da Amazônia, é comum ocorrer as maiores quedas de temperatura do ar, conforme descrito por Viana e Herdies *et al*. (2018), que caracterizaram esses eventos entre 1961 e 1990. Por exemplo, a cidade de Rio Branco – AC, na região Sul, pode registrar temperaturas mínimas de 16,5ºC, enquanto Manaus – AM, localizada na região Central, atinge uma temperatura mínima de 22,7ºC.

Em 2001, Oliveira *et al.* (2004) identificaram que a entrada de massas de ar frio em uma floresta em Rondônia é capaz de alterar as componentes do balanço de energia, bem como aumentar a absorção de $CO_2$ durante o dia, devido ao aumento do campo de vento. Anteriormente, em 1993, Fisch *et al.* (2004) caracterizam que uma friagem é capaz de modificar a camada limite acima de uma floresta, reduzindo a rugosidade do dossel por meio do aumento da turbulência.

Considerando que a região Sul da Amazônia é uma área de expansão da fronteira agrícola, com uma taxa de conversão de aproximadamente 4000 $km^2$ de florestas para áreas agrícolas e de pecuária por ano (COSTA *et al.*, 2019), são poucos os estudos realizados sobre friagens em diferentes tipos de cobertura de terra que compõe o cenário de mudanças no uso e cobertura do solo. Portanto, este estudo tem como objetivo caracterizar o evento de friagem em locais com cobertura florestal, pastagem e áreas urbanas na região central do Estado de Rondônia no ano de 2017, bem como, compreender a atuação desses fenômenos em cada tipo de cobertura.

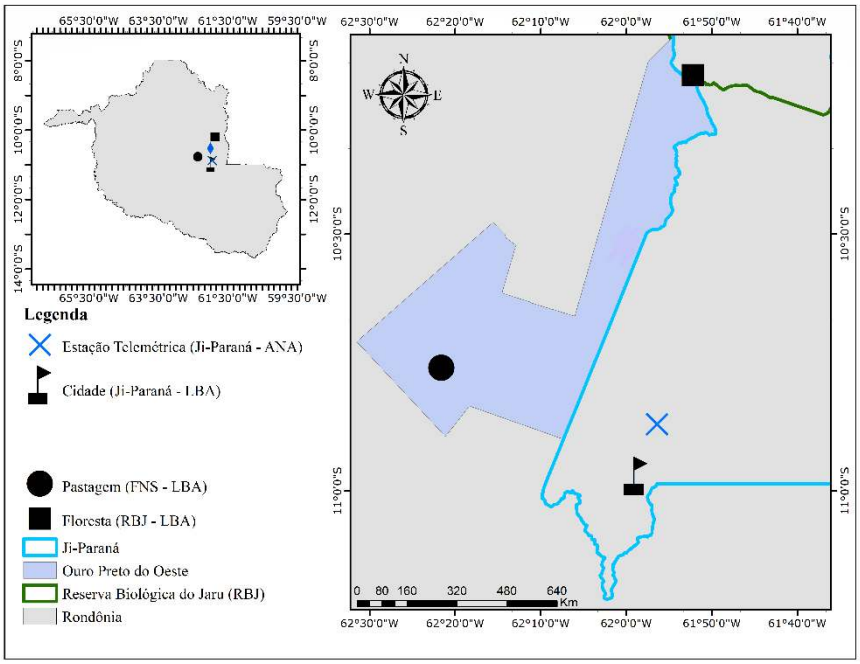
## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Descrição da Área de Estudo

Foram utilizados dados das estações micrometeorológicas instaladas na floresta, cidade e pastagem, todas monitoradas pelo Programa de Grande Escala da Biosfera-

Atmosfera na Amazônia (Programa LBA), na região central do Estado de Rondônia. Para caracterizar a chuva na cidade, foram utilizados os dados de chuva coletados pela Agência Nacional das Águas (ANA). As estações micrometeorológicas do LBA localizadas na floresta e na cidade estão situadas no município de Ji-Paraná, enquanto a estação de pastagem, está localizada no município de Ouro Preto do Oeste, como mostrado na Figura 1 (marcadas em preto). A estação pluviométrica da ANA utilizada para caracterizar a chuva na cidade em 2017 está localizada na área urbana do município de Ji-Paraná, como indicado na Figura 1 (marcada em azul).

**Figura 1** - Localização dos pontos de medições micrometeorológicas em Rondônia, com a identificação dos limites dos municípios de Ji-Paraná e Ouro Preto do Oeste. Os pontos em preto representam as estações do Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia - LBA e os pontos azuis as estações da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA.




**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

Devido à estação micrometeorológica da cidade possuir dados apenas do ano de 2017, esse foi o ano considerado no estudo. As médias de cada 30min da floresta foram armazenadas no Datalogger CR1000 (*Campbell Scientific Inc.*) em uma torre de 62m de altura, localizada em uma floresta tropical primária (61,87º O e 10,19º S) na Reserva Biológica do Jaru.

Os dados da pastagem foram armazenados em médias de 10min no Datalogger CR1000 (*Campbell Scientific Inc.*), na torre de 08m de altura em uma área composta por *Brachiaria brizantha* (62,36º O e 10,76º S), com altura média de 15cm (ZANCHI *et al.*, 2009). Essa área

está em regime de pastejo permanente, e localiza-se aproximadamente a 10km da área urbana do município de Ouro Preto do Oeste.

Os dados da cidade foram coletados no *campus* da Universidade Federal de Rondônia (UNIR) (61,98º O e 10,97º S), a uma altura de 10m. Essa estação não possuía registros pluviométricos, sendo utilizados os dados da estação da ANA de código 15560000 (61,94º O e 10,87º S), localizada na área urbana de Ji-Paraná, e esses dados foram armazenados com médias a cada 15min.

## 2.2. Elementos Meteorológicos

Os dados de chuva, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento foram coletados no período entre 01 e 31 de julho do ano de 2017, e estão detalhados na Tabela 1.

**Tabela 1 -** Elementos meteorológicos, instrumentos e altura de medições para a estação micrometeorológica automática instalada na área de floresta (RBJ), pastagem (FNS) e cidade (Ji-Paraná).

| Variável | Sensor | Unidade | Altura do Sensor (m) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Floresta | Pastagem | Cidade |
| Temperatura e Umidade Relativa do Ar | Termohigrômetro (HMP35A) *Vaisala e Solar* | °C | 62 | 08,30 | 10 |
| Velocidade e Direção do Vento | WindSonic *Gill* e A100R *Campbell* / Wind Monitor 05103 *Young* (08,70m) / *Solar* | m $s^{-1}$ / graus | 62 e 30 | 08,70 | Sem dados |
| Chuva | ARG 100 (NE29 7SE)/*Vaisala e GOES RHNR2018* | mm | 62 | 01,50 | valor indeterminado * |

**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

## 2.3. Determinação dos Episódios de Friagem

Para observar a ocorrência de friagens, o mês de julho de 2017 foi escolhido (dias julianos 182 a 212), sendo a friagem definida como o efeito da massa polar que se estendeu por 4 dias (dias julianos 198 a 201). Durante essa investigação, adotou-se como condições normais o valor médio dos dias do mês, excluindo os 4 dias do evento. Por outro lado, a condição média de um dia de friagem foi determinada utilizando-se o valor médio dos dias

afetados pelo evento.

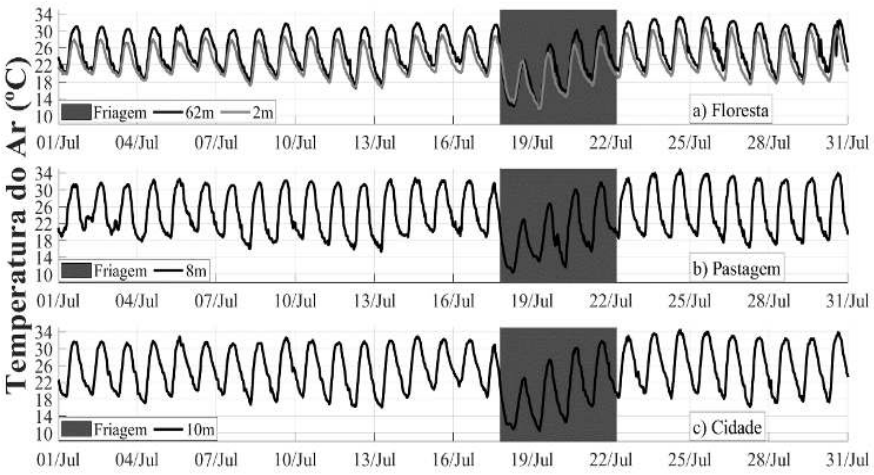
Diversos critérios influenciaram a escolha desse período específico. Primeiramente, considerou-se a disponibilidade de dados em todos os locais, levando em conta as falhas ocorridas nos registros da pastagem durante o mês de junho. Além disso, julho é conhecido por apresentar um elevado número de ocorrências de friagem na Região Amazônica, como mencionado por Prince, Evans *et al.* (2018). Por fim, entre os meses de abril a setembro, observa-se uma média de 6 a 7 eventos de friagem, sendo que Fisch *et al.* (2004) descreveram o evento mais intenso ocorrido em julho nos mesmos locais de floresta e pastagem avaliados neste estudo, especialmente nos anos de 1992 e 1993.

## 3. DESENVOLVIMENTO

O evento de friagem selecionado ocorreu entre os dias 17 e 20 de julho. Estudos de macroescala realizados por Santos *et al.* (2017) na cidade de Coxim, situada na latitude 18°, demonstraram uma duração média de 4 dias para tais eventos. Por sua vez, pesquisas conduzidas por Reboita, Escobar e Lopes (2015) em latitudes mais altas, a 21°, revelaram uma duração média de 3 dias. Esses dados sugerem que as ondas polares atingem o Estado de Rondônia com menor intensidade em comparação a latitudes mais elevadas, uma vez que levam aproximadamente de 2 a 4 dias para que as temperaturas retornem aos níveis anteriores à chegada da friagem.

A Figura 2 apresenta a dinâmica da temperatura no mês de julho na região. De forma geral, é observada uma sincronia na queda de temperatura abaixo de 20ºC nas diferentes áreas de cobertura, e em particular, na floresta, há uma uniformização das temperaturas acima e abaixo do dossel. Em relação ao efeito do evento sobre a temperatura nos diferentes ambientes, foi observada uma redução nos picos máximos diários durante dois dias.

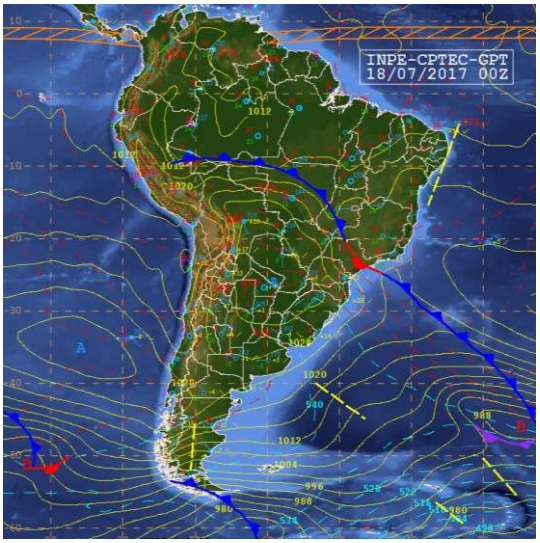
**Figura 2** – Comparação das temperaturas nos locais analisados em julho de 2017: a) na floresta acima do dossel a uma altura de 62m e abaixo do dossel a uma altura de 2m; b) na pastagem a uma altura de 8,30m, e; c) na cidade em um ponto dentro do perímetro urbano a uma altura de 10m. A área sombreada em cor cinza corresponde ao evento de friagem ocorrido entre 17 e 20 de julho de 2017.




**Fonte:** Elaborado pelos autores (2022).

Um estudo realizado em 1994 nas torres da floresta e da pastagem, conduzido pelos autores Fisch *et al.* (2004), investigou a ocorrência de eventos de friagem entre os meses de abril e setembro. Essa pesquisa identificou a ocorrência de 6 a 7 eventos nesse período, com uma duração média de 2 dias. Esses resultados indicam que nem todas as incursões de massas de ar polar nos estados de Rio Grande do Sul e Santa Catarina resultarão em friagens no Estado de Rondônia.

**Figura 3** – Carta Sinótica da América do Sul durante um evento de Friagem (dia juliano 198) (Fonte: CPTEC-INPE, http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt).




**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

A queda de temperatura registrada na Figura 2, a partir das 19h00 do horário local (HL) do dia 17 de julho de 2017 (dia juliano 198), foi corroborada pela análise da carta sinótica apresentada na Figura 3. Na figura, é possível observar a presença da linha de frente fria avançando sobre o norte de Rondônia, Acre e adentrando o sul do Amazonas. Isso indica que a friagem afetou os diferentes locais de medição, resultando em uma redução abrupta na temperatura média do ar.

Conforme os dados coletados na área da floresta, observou-se que a temperatura entre 19h e 23h HL registrou uma redução significativa, diminuindo de 25,01°C para 17,42°C. Na pastagem, a temperatura caiu de 20,53°C para 13,82°C, enquanto na cidade houve uma diminuição de 21,05°C para 14,25°C. No dia seguinte, em 18 de julho, às 09h00min, ocorreu uma nova redução da temperatura, resultando em uma queda adicional de 13°C na pastagem, 11°C na cidade e 10°C na floresta, em menos de 24 horas.

No dia 19 de julho, às 09h00min, a temperatura do ar atingiu o valor mais baixo na floresta, com 13,26°C, seguida pela cidade com 14,33°C. Por outro lado, na pastagem ocorreu um aumento da temperatura, atingindo 16,03°C. Após esse período, todos os locais começaram a apresentar um aumento gradual da temperatura do ar.

A Tabela 2 fornece os valores médios diários para um dia normal e um dia de friagem em julho. É importante destacar que a temperatura mínima (Tmín) foi a variável que apresentou a maior redução em todos os locais analisados, com uma média de 31% de diminuição em comparação a um dia normal. No dia normal, a temperatura máxima média foi de 34ºC, enquanto nos dias afetados pela friagem, esse valor diminuiu para 31ºC. Portanto, considerando a influência da friagem nos microclimas avaliados, houve um resfriamento médio de aproximadamente 4ºC em relação aos valores observados em um dia normal.

**Tabela 2** - Temperatura média, máxima e mínima para dias normais e de friagem nos locais analisados.

| Variáveis | Sítios | Dia normal | Dia de Friagem | Diferença | (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Tar(°C) | Floresta | 25,89 | 20,93 | 04,96 | 19,16 |
| | Pastagem | 25,01 | 19,63 | 05,38 | 21,51 |
| | Cidade | 25,49 | 19,68 | 05,81 | 22,79 |
| Tmax(°C) | Floresta | 33,29 | 31,46 | 01,83 | 05,50 |
| | Pastagem | 34,79 | 31,50 | 03,29 | 09,46 |
| | Cidade | 34,40 | 30,94 | 03,46 | 10,06 |
| Tmín(°C) | Floresta | 16,52 | 11,83 | 04,69 | 28,39 |
| | Pastagem | 15,32 | 10,41 | 04,91 | 32,05 |
| | Cidade | 16,08 | 10,59 | 05,49 | 34,14 |

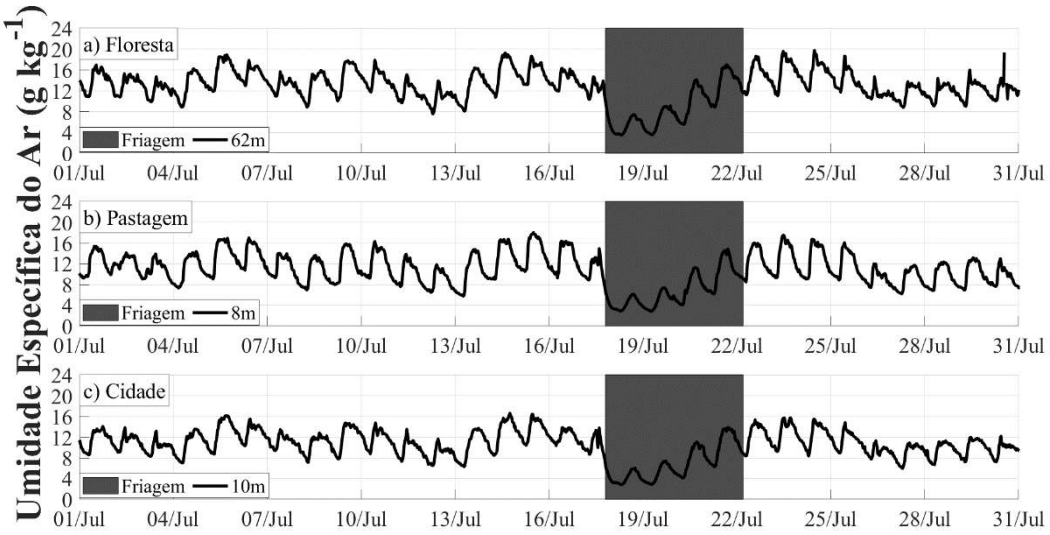
**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

Na área da floresta, estudos anteriores realizados por Fisch *et al.* (2004) identificaram uma temperatura mínima de 15,1°C em julho de 1993, enquanto Oliveira *et al.* (2004) registraram uma temperatura mínima de 13°C em junho de 2001. Esses valores são superiores aos observados em julho de 2017, que foi de 11,83°C de acordo com a Tabela 2.

Os resultados das temperaturas mínimas em Rondônia foram ainda menores na pastagem e na cidade, e esses achados se assemelham aos resultados reportados por Viana e Herdies (2018), que registraram uma temperatura mínima de 11,0°C em Rio Branco, Acre, em julho de 2013. Esses mesmos autores também relataram que durante o mesmo evento de friagem, a temperatura mínima em Manaus e Manicoré, no estado do Amazonas, foi de 21°C e 18°C, respectivamente. Esses dados indicam que os estados do Acre e Rondônia são mais afetados pelas friagens em comparação a outras regiões.

Na Figura 4, apresenta-se a variação da umidade específica do ar durante o evento de friagem. É possível observar uma diminuição significativa nos valores de umidade específica do ar nos diferentes locais analisados. Na floresta, ocorreu uma redução de 6,18 g $kg^{-1}$, seguida por uma redução de 5,49 g $kg^{-1}$ na pastagem e 5,28 g $kg^{-1}$ na cidade. Essas condições são características das friagens, que são eventos climáticos caracterizados pela presença de massas de ar frias e secas. Esses padrões de friagens como a redução da umidade específica do ar são comuns durante o período do ano sobre a América do Sul, conforme descrito por Varejão-Silva (2006, p. 372).

**Figura 4** – Comparação da umidade específica nos locais analisados em julho de 2017: a) na floresta acima do dossel a uma altura de 62m e abaixo do dossel a uma altura de 2m; b) na pastagem a uma altura de 8,30m, e; c) na cidade em um ponto dentro do perímetro urbano a uma altura de 10m. A área sombreada em cor cinza corresponde ao evento de friagem ocorrido entre 17 e 20 de julho de 2017.




**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

De acordo com os dados da Tabela 03, foi observada uma redução da umidade específica do ar durante o evento de friagem nos sítios analisados. A umidade mínima (qmín) apresentou a maior redução, com uma média de 52% em relação a um dia normal. Em contraste, a umidade máxima (qmáx) teve a menor redução na floresta, com uma média de 25,53%. Esses resultados indicam uma diminuição considerável da umidade do ar durante a ocorrência da friagem nos locais estudados.

**Tabela 3** – Umidade específica média, máxima e mínima para dias normais e de friagem nos locais analisados.

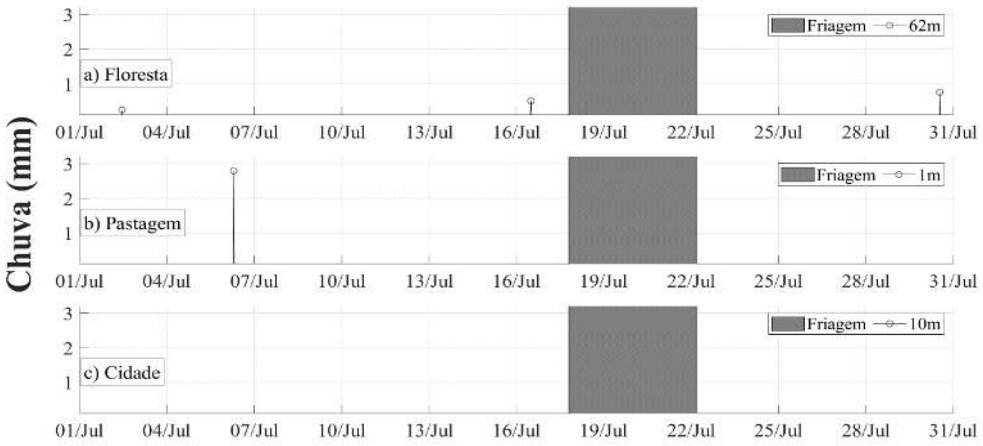
| | Sítio | Dia normal | Dia de Friagem | Diferença | (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| qmed (g kg$^{-1}$) | Floresta | 13,46 | 08,14 | 05,32 | 39,52 |
| | Pastagem | 11,36 | 06,59 | 04,77 | 41,98 |
| | Cidade | 11,08 | 06,51 | 04,57 | 41,24 |
| qmáx (g kg$^{-1}$) | Floresta | 19,74 | 14,70 | 05,04 | 25,53 |
| | Pastagem | 18,03 | 14,94 | 03,09 | 17,14 |
| | Cidade | 16,60 | 13,76 | 02,84 | 17,11 |
| qmín (g kg$^{-1}$) | Floresta | 07,52 | 03,47 | 04,05 | 53,86 |
| | Pastagem | 05,75 | 02,86 | 02,89 | 50,26 |
| | Cidade | 05,95 | 02,84 | 03,11 | 52,27 |

**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

A friagem, resultante da entrada de uma onda polar, é caracterizada por uma massa de ar mais densa, fria e seca, e normalmente provoca chuvas frontais quando entra em contato com a massa de ar quente e úmida da região Amazônica (SILVA DIAS *et al.*, 2004).

Para observar a ocorrência desse fenômeno observou-se a chuva na Figura 5. Possivelmente ocorreu uma chuva de origem frontal como é vista na Figura 5, onde a floresta registrou chuva no dia 17 de julho, o que também é observado em áreas florestais até o Estado do Amazonas (CAMARINHA-NETO *et al.*, 2021). Embora a chuva frontal tenha sido observada apenas na floresta, os totais de chuva neste mês foram maiores na cidade, com 03,40 mm, seguidos pela pastagem, com 02,79 mm, e pela floresta, com 01,52 mm.

**Figura 5** – Comparação da chuva nos locais analisados em julho de 2017: a) na floresta acima do dossel a uma altura de 62m; b) na pastagem a uma altura de 1,50m, e; c) na cidade em um ponto dentro do perímetro urbano mensurada pela estação pluviométrica e telemétrica da ANA. A área sombreada em cor cinza corresponde ao evento de friagem ocorrido entre 17 e 20 de julho de 2017.

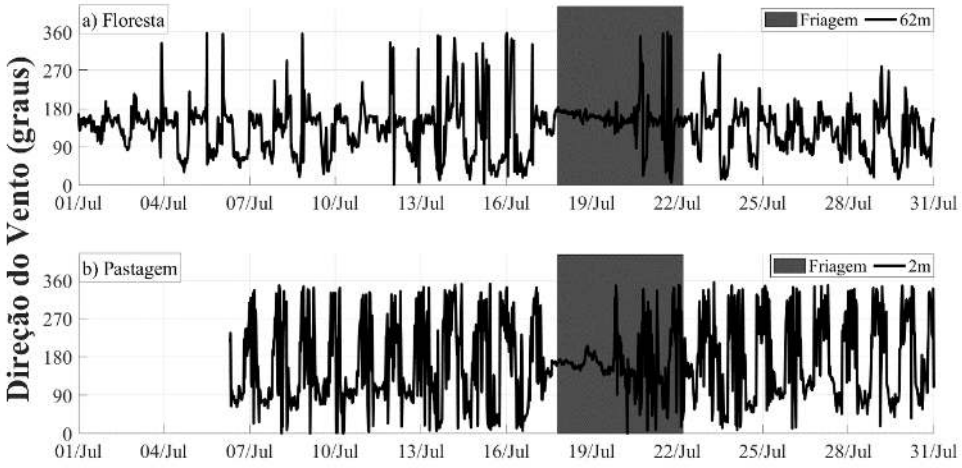



**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

Dado que este estudo analisa apenas um evento, é cedo para sugerir que o aumento da chuva nas áreas antropizadas seja devido ao efeito descrito por Leite-Filho *et al.* (2021), onde áreas próximas às florestas, em células de 28 km x 28 km, tendem a apresentar um aumento na quantidade de chuva até um limite de 55-60% de perda de floresta. Mesmo assim, os totais de chuva observados neste estudo, quando comparados aos resultados para uma floresta no Estado do Amazonas pelos autores Camarinha-Neto *et al.* (2021), resultaram em chuvas de 21mm em julho de 2014, ou seja, apresentaram índices de chuva mais altos o que pode sugerir um desenvolvimento do encontro frontal se comparado à Rondônia.

Na Figura 6 é possível observar a direção do vento, onde 360º equivale ao norte e 180º ao sul. A direção do vento predominante nos sítios é sul. Como o evento de friagem tem como origem o Atlântico Sul, quando esses eventos atingem a Amazônia ocorre predominância dessa direção do vento, conforme Silva Dias *et al.* (2004). Camarinha-Neto *et al.* (2021) observam o mesmo comportamento nos dados de direção do vento durante um evento de friagem na Torre Alta da Amazônia no Amazonas.

**Figura 6** - Comparação entre a direção de vento nos locais analisados em julho de 2017: a) na floresta acima do dossel, 62m; b) na pastagem mensurada a 08,70m. A área sombreada em cor cinza corresponde ao evento de friagem ocorrido entre 17 e 20 de julho de 2017.

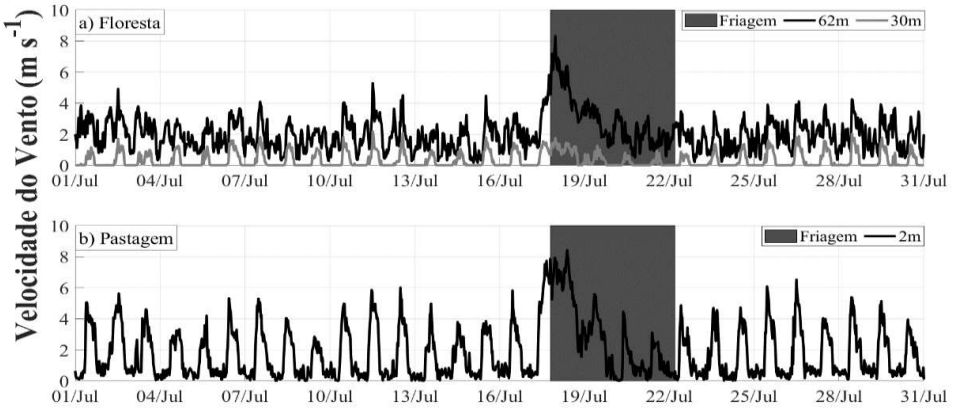



**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

Na Figura 7, pode ser observado que, com a friagem nos sítios da floresta e pastagem ocorre um aumento na velocidade do vento, em que os valores que ficavam em torno de 04 m $s^{-1}$ são duplicados com valores de aproximadamente 08,30 m $s^{-1}$. Esse comportamento foi observado pelos autores Marengo *et al.* (1997) em Ji-Paraná durante uma friagem em julho de 1993.

Na floresta, os ventos evidenciam a influência da estratificação do dossel (FIGURA 7a) onde ocorreu uma amortização da velocidade do vento abaixo do dossel (30m) comparado aos valores acima do dossel (62m). Sendo assim, a rugosidade da floresta consegue manter maior estabilidade do microclima abaixo de dossel sob eventos climáticos de maior escala como a friagem.

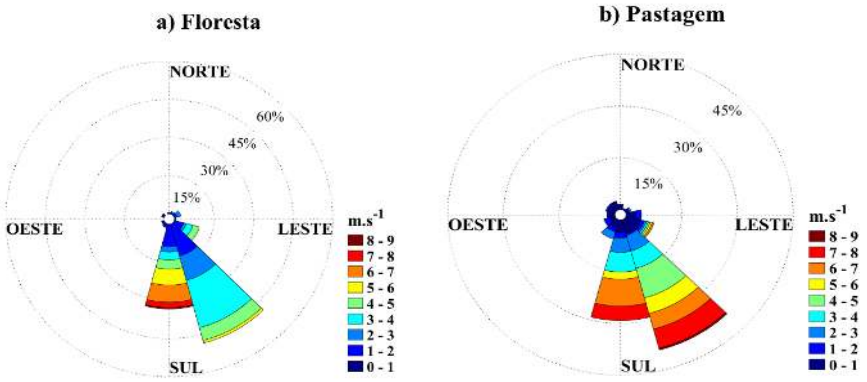
**Figura 7** - Comparação entre a velocidade de vento nos locais analisados em julho de 2017: a) na floresta acima do dossel, 62m, e abaixo do dossel a 30m; b) na pastagem mensurada a 08,70m. A área sombreada em cor cinza corresponde ao evento de friagem ocorrido entre 17 e 20 de julho de 2017.




**Fonte:** Elaborado pelos autores (2022).

A rosa dos ventos é observada na Figura 8 durante os dias do evento de friagem. As direções dos ventos nesse período tiveram maior frequência a sudeste. As maiores velocidades ocorreram na pastagem com ventos de sudeste de até 9 m $s^{-1}$, e na floresta a maior velocidade foi ao sul, com 7 m $s^{-1}$.

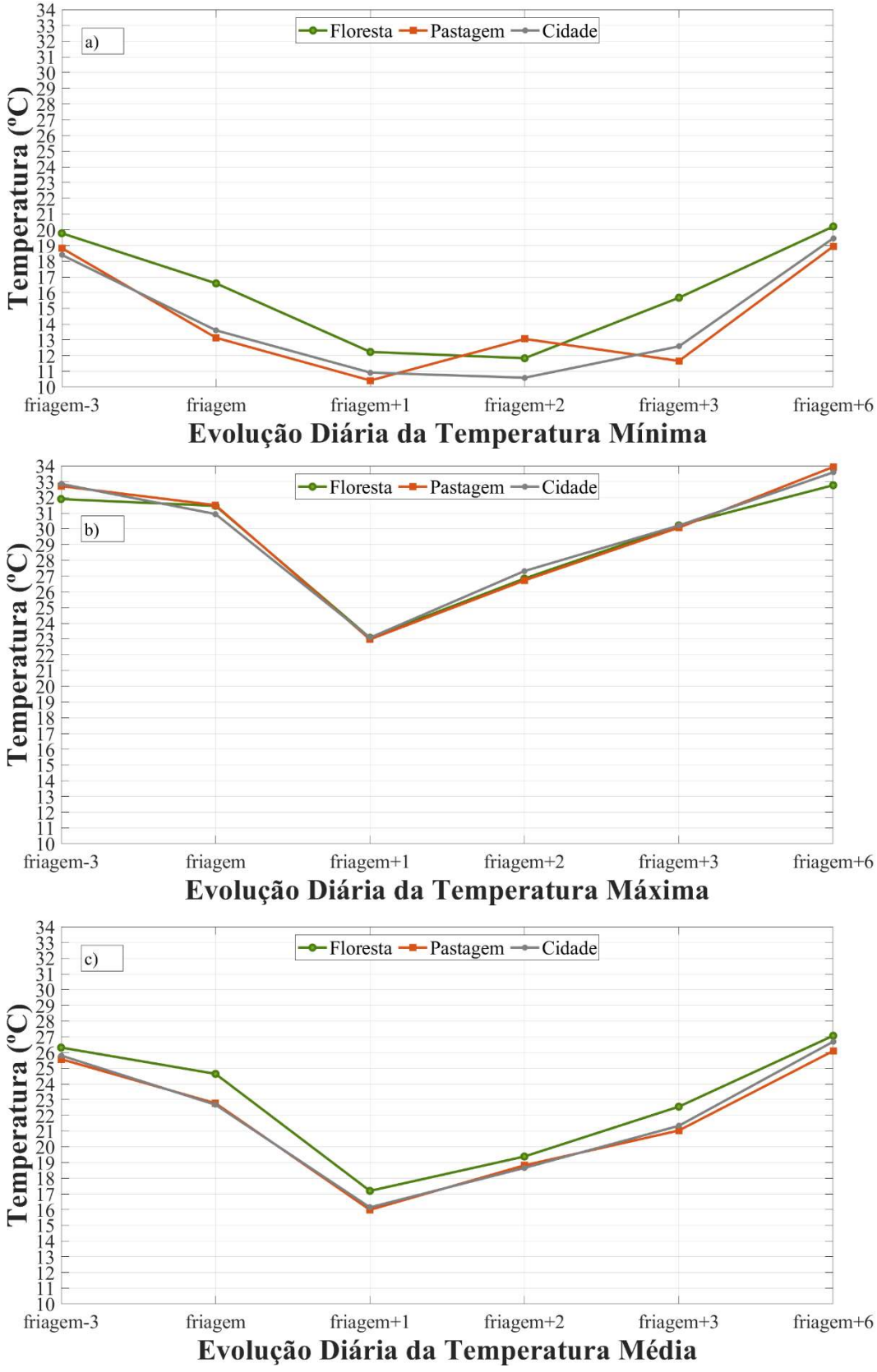
**Figura 8** – Rosa dos ventos durante o evento de friagem entre 17 e 20 de julho de 2017: a) na floresta acima do dossel, 62m; b) na pastagem mensurada a 08,70m.




**Fonte:** Elaborado pelos autores (2022).

Para avaliar o efeito da cobertura do solo no evento de friagem, foi analisada a evolução da temperatura em diferentes períodos. A Figura 9 apresenta a variação da temperatura em três dias antes do evento de friagem (friagem-3, em 14 de julho), no dia da chegada do evento (friagem, em 17 de julho) e nos dias 18 a 20 de julho (friagem+1 e friagem+2, friagem+3), bem como três dias após o término do evento, em 23 de julho.

**Figura 9** - Evolução diária da temperatura mínima do ar (a), temperaturas máximas (b) e temperatura média (c) durante o evento de friagem. A comparação é feita entre os 03 dias anteriores à friagem (friagem-3), os dias de friagem (friagem+1 até +3) e os 03 dias seguintes à friagem (friagem+6).




**Fonte:** Elaborado pelos autores (2023).

Com a chegada da friagem, houve uma redução nas temperaturas mínimas e máximas nos diferentes locais analisados (FIGURA 9ab). Na floresta, a temperatura mínima diminuiu 7,55°C, na pastagem a redução foi de 8,42°C e na cidade foi de 7,49°C. Em relação à temperatura máxima, foi registrada uma diminuição mais acentuada, com uma queda de 8,81°C na floresta, 9,73°C na cidade e 9,77°C na pastagem. Essa redução simultânea nos extremos da temperatura em todas as coberturas explica a pequena diferença na temperatura média entre as áreas avaliadas (FIGURA 9c).

Comparando os resultados deste estudo com o estudo de Oliveira *et al.* (2004) realizado na Reserva Biológica do Jaru durante um evento de friagem em 2001, observa-se uma diferença na redução da temperatura máxima. Enquanto Oliveira *et al.* (2004) relataram uma redução de 10,7°C na temperatura máxima, neste estudo a diminuição foi menor. No entanto, ambos os estudos mostram um impacto da friagem na temperatura máxima.

Em relação à temperatura mínima, os resultados deste estudo não apresentaram diferenças em comparação com o estudo anterior de Oliveira *et al.* (2004), que registrou uma redução de 7,1°C na temperatura mínima durante o evento de friagem.

Após a passagem do evento de friagem (friagem+1 e friagem+2), observou-se um aumento gradual da temperatura, retornando aos valores anteriores à friagem somente após o terceiro dia. Isso indica que o efeito da friagem na temperatura é transitório e que as condições climáticas retornam gradualmente ao padrão normal após o evento.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A temperatura mínima foi a variável mais afetada pela ocorrência da friagem, com redução superior a 31% em todos os sítios analisados. A umidade específica mínima também sofreu uma redução significativa, com uma diminuição média de 52% em comparação a um dia normal, sendo levemente mais acentuada na floresta em relação à pastagem e à cidade. A velocidade do vento aumentou consideravelmente com a chegada da friagem, dobrando sua magnitude na pastagem e na floresta. No entanto, a velocidade do vento abaixo do dossel da floresta foi influenciada pela rugosidade do dossel. Em relação à quantidade de chuva, foi observado que os ambientes antropizados, como a cidade e a pastagem, registraram maiores volumes, com 3,40 mm na cidade, 2,79 mm na pastagem e 1,52 mm na floresta.

Os efeitos da friagem sobre os microclimas das diferentes coberturas mostraram

respostas semelhantes, com redução da temperatura do ar e da umidade do ar, além do aumento da velocidade do vento. No entanto, houve diferenças na intensidade desses efeitos em cada sítio, assim como na quantidade de chuva registrada, o que pode ser atribuído às características distintas de cada cobertura do solo.

## AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem o apoio financeiro como Bolsista BP-IV concedida pela Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa, Extensão e Interiorização do IFAM - FAEPI, nos termos da concessão 088/2022, 0018/2023 e 0983/2023. Agradecemos ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE No. 2717/2015, pelo apoio técnico-científico fornecido até o momento. Os autores agradecem ao Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia pelo apoio humano, técnico e científico para a realização desta pesquisa, ao escritório regional do Programa LBA em Ji-Paraná, ao grupo de micrometeorologia do LBA sediado em Manaus, e a Universidade Federal de Rondônia.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, S. S. *et al.* $CO_2$, CO, hydrocarbon gases and PM2.5 emissions on dry season by deforestation fires in the Brazilian Amazônia. **Environmental Pollution**, v. 249, p. 311–320, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749118354861. Acesso em: 15 dez. 2022.

AMORIM NETO, A. DE C.; SATYAMURTY, P.; CORREIA, F. W. Some observed characteristics of frontal systems in the Amazon Basin. **Meteorological Applications**, v. 22, n. 3, p. 617–635, 2015. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/met.1497. Acesso em: 15 dez. 2022.

CAMARINHA-NETO, G. F. *et al.* The friagem event in the central Amazon and its influence on micrometeorological variables and atmospheric chemistry. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, n. 1, p. 339–356, 2021. Disponível em: https://acp.copernicus.org/articles/21/339/2021/. Acesso em: 14 dez. 2022.

COSTA, M. H. *et al.* Climate risks to Amazon agriculture suggest a rationale to conserve local ecosystems. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 17, n. 10, p. 584–590, 2019. Disponível em: https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fee.2124. Acesso em: 16 abr. 2021.

FISCH, G. *et al.* The climate of Amazônia - a review. **Acta Amazonica**, v. 28, n. 2, p. 101–101, 1998. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0044-59671998000200101&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 02 maio 2019.

FISCH, G. *et al.* The convective boundary layer over pasture and forest in Amazônia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1, p. 47–59, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00704-004-0043-x. Acesso em: 10 dez. 2022.

GARREAUD, R. Cold Air Incursions over Subtropical and Tropical South America: A Numerical Case Study. **Monthly Weather Review**, v. 127, n. 12, p. 2823–2853, 1999. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/127/12/1520-0493_1999_127_2823_caiosa_2.0.co_2.xml. Acesso em: 19 mar. 2021.

GARREAUD, R.; WALLACE, J. M. Summertime Incursions of Midlatitude Air into Subtropical and Tropical South America. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 10, p. 2713–2733, 1998. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/126/10/1520-0493_1998_126_2713_siomai_2.0.co_2.xml. Acesso em: 18 mar. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **A taxa consolidada de desmatamento por corte raso para os nove estados da Amazônia Legal** (AC, AM, AP, MA, MT, PA, RO, RR e TO) em 2019 é de 10.129 km2. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5465>. Acesso em: 13 ago. 2020.

LANFREDI, I. S.; CAMARGO, R. DE. Classification of Extreme Cold Incursions over South America. **Weather and Forecasting**, v. 33, n. 5, p. 1183–1203, 2018. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/33/5/waf-d-17-0159_1.xml. Acesso em: 10 dez. 2022.

LEITE-FILHO, A. T. *et al.* Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 2591, 2021. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41467-021-22840-7. Acesso em: 28 jun. 2021.

LONGO, M.; CAMARGO, R. DE; DIAS, M. A. F. DA S. Análise das Características Dinâmicas e Sinóticas De Um Evento De Friagem Durante A Estação Chuvosa No Sudoeste Da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, p. 59–72, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ricardo_De_Camargo/publication/257874352_Analise_das_caracteristicas_dinamicas_e_sinoticas_de_um_evento_de_friagem_durante_a_estacao_chuvosa_no_sudeste_da_Amazonia/links/54dd005d0cf28a3d93f8898c/Analise-das-caracteristicas-dinamicas-e-sinoticas-de-um-evento-de-friagem-durante-a-estacao-chuvosa-no-sudeste-da-Amazonia. Acesso em: 07 jul. 2023.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; CULF, A. D. Climatic Impacts of “Friagens” in Forested and Deforested Areas of the Amazon Basin. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 36, n. 11, p. 1553–1566, 1997. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/36/11/1520-0450_1997_036_1553_ciofif_2.0.co_2.xml. Acesso em: 20 jul. 2022.

METCALFE, D. B. *et al.* Impacts of fire on sources of soil $CO_2$ efflux in a dry Amazon rain forest. **Global Change Biology**, v. 24, n. 8, p. 3629–3641, 2018. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.14305. Acesso em: 05 jul. 2022.

OLIVEIRA, G. DE *et al.* Rapid Recent Deforestation Incursion in a Vulnerable Indigenous Land in the Brazilian Amazon and Fire-Driven Emissions of Fine Particulate Aerosol Pollutants. **Forests**, v. 11, n. 8, p. 829, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/1999-4907/11/8/829. Acesso em: 22 jan. 2021.

OLIVEIRA, P. J. *et al.* Efeitos de um evento de friagem nas condições meteorológicas na Amazônia: um estudo de caso. **Acta Amazonica**, v. 34, p. 613–619, 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/j/aa/a/ZTpt7qwnNXVJGC4cY8X96SK/?lang=pt. Acesso em: 30 ago. 2021.

PACA, V. H. DA M. *et al.* The spatial variability of actual evapotranspiration across the Amazon River Basin based on remote sensing products validated with flux towers. **Ecological Processes**, v. 8, n. 1, p. 6, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s13717-019-0158-8. Acesso em: 12 abr. 2021.

PAVÃO, V. M. *et al.* Impacto da Conversão da Cobertura Natural em Pastagem e Área Urbana sobre Variáveis Biofísicas no Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 343–351, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/j/rbmet/a/K386zvC79vGrcLggqBvGqPf/?lang=pt. Acesso em: 08 mar. 2022.

REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G.; LOPES, V. Climatologia Sinótica de Eventos de Ondas de Frio Sobre a Região Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, n. 0, 2015. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/40327. Acesso em: 11 set. 2021.

SAMPAIO, G. *et al*. $CO_2$ physiological effect can cause rainfall decrease as strong as large-scale deforestation in the Amazon. **Biogeosciences**, v. 18, n. 8, p. 2511–2525, 2021. Disponível em: https://bg.copernicus.org/articles/18/2511/2021/. Acesso em: 17 maio 2021.

SANTOS, M. J. M. *et al*. Avaliação das temperaturas mínimas e máximas para eventos de friagem no Pantanal. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 430–438, 2017. Disponível em: https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/1460. Acesso em: 15 abr. 2023.

SÁTYRO, Z. C. *et al.* The relative and joint effect of rivers and urban area on a squall line in the Central Amazônia. **Science of The Total Environment**, v. 755, p. 142178, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720357077. Acesso em: 17 jan. 2021.

SILVA DIAS, M. A. F. *et al.* River breeze circulation in eastern Amazônia: observations and modelling results. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1, p. 111–121, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00704-004-0047-6. Acesso em: 15 dez. 2022.

SILVA, M. T. *et al.* Application of Spatial Modeling of Biophysical Variables in an Urbanized Area in the Amazon: The Case of the Metropolitan Area of Belém-Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 271–283, 2021. Disponível em: http://www.scielo.br/j/rbmet/a/BNhNycZKdKZM6MB9Pm7h8pQ/?lang=en. Acesso em: 08 mar. 2022.

TÓTA, J. *et al.* Amazon rain forest subcanopy flow and the carbon budget: Santarém LBA-ECO site. Journal of Geophysical Research: **Biogeosciences**, 2008. Disponível em: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JG000597%4010.1002/%28ISSN%292169-8961.AMAZONC1. Acesso em: 11 ago. 2019.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2. ed. Recife: Versão Digital 2, 2006.

VIANA, L. P.; HERDIES, D. L. Estudo de Caso de um Evento Extremo de Incursão de Ar Frio em julho de 2013 sobre a Bacia Amazônica Brasileira. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 27–39, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/j/rbmet/a/9RN886HDmr9n8PMg4MTSm3y/?lang=pt. Acesso em: 10 dez. 2022.

ZANCHI, F. B. *et al.* Estimate of the Leaf Area Index (LAI) and Biomass in pasture in the state of Rondônia - Brazil. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 2, p. 335–348, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/aa/a/N7mg8QdDrdtQwr5nhfskQ9b/abstract/?lang=pt. Acesso em: 20 ago. 2018.

PRINCE, K. C.; EVANS, C. A Climatology of Extreme South American Andean Cold Surges. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 57, n. 10, p. 2297–2315, 2018. Disponível em https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/57/10/jamc-d-18-0146.1.xml. Acesso em: 13 abr. 2023.